

# Photovoltaic Solar Energy Conversion

## Exercises

November 2008

### Exercício 1

Considere a radiação solar, num dia de céu azul, incidente perpendicularmente sobre um painel fotovoltaico, com intensidade de  $1000 \text{ W m}^{-2}$ . A distribuição espectral ( $\mu\text{m}$  em abcissas,  $\text{kW m}^{-2}\mu\text{m}^{-1}$  em ordenadas) está representada pela curva AM1.5 da Fig. 3.8 do livro G. Boyle, *Renewable Energy*, sendo a área limitada pela curva igual a cerca de  $1000 \text{ W/m}^2$ . Para simplificar, o espectro contínuo foi substituído por um espectro discreto com 5 componentes, correspondentes a 5 comprimentos de onda  $\lambda = 0,4, 0,8, 1,2, 1,6, 2,0 \mu\text{m}$ . ( $1\mu\text{m} = 10^{-6} \text{ m}$ ). A tabela abaixo dá a intensidade de energia correspondente a cada um dos 5 comprimentos de onda.

| $\lambda (\mu\text{m})$ | Intensidade ( $\text{W m}^{-2}$ ) |
|-------------------------|-----------------------------------|
| 0,4                     | 280                               |
| 0,8                     | 380                               |
| 1,2                     | 170                               |
| 1,6                     | 110                               |
| 2,0                     | 60                                |
| <b>TOTAL 1000</b>       |                                   |

- Determine, para cada um dos 5 componentes (comprimentos de onda) do espectro considerado, a energia dum fóton (expressa em J).
- Determine, para cada um dos 5 componentes (comprimentos de onda) do espectro considerado, o número de fótons que incidem, por segundo, sobre um painel com a área de  $1 \text{ m}^2$  (incidência perpendicular).

Considere dois tipos de células fotovoltaicas:

- Silício (Si)**, para o qual o *band gap* é  $E = 1,11 \text{ eV} = 1,78 \times 10^{-19} \text{ J}$ .
- Diselenieto de Cobre e Índium ( $\text{CuInSe}_2$ )**, para o qual o *band gap* é  $E = 1,01 \text{ eV} = 1,62 \times 10^{-19} \text{ J}$ .

- Indique, para cada um dos dois tipos de células (**Si** e de  **$\text{CuInSe}_2$** ), quais os comprimentos de onda (de entre os 5 considerados) que contribuem para a produção de energia eléctrica da célula.
- Determine, para um painel de  $1 \text{ m}^2$  de **Si**, a potência eléctrica que, teoricamente, pode ser produzida, e o respectivo rendimento. Idem para  **$\text{CuInSe}_2$** .
- Explique porque é o rendimento das células fotovoltaicas sempre muito inferior a 100%.

### Exercício 2

Dos materiais potencialmente utilizáveis para células fotovoltaicas constantes da tabela reproduzida abaixo (e também reproduzida na apresentação em Powerpoint), qual o que,

teoricamente, permite um rendimento de conversão mais elevado sob a acção de radiação laser monocromática com comprimento de onda  $0,5\text{ }\mu\text{m}$  ?

| <b>Band Gap for some candidate materials for photovoltaic cells</b> |                      |                                 |                      |
|---------------------------------------------------------------------|----------------------|---------------------------------|----------------------|
| <b>Material</b>                                                     | <b>Band Gap (eV)</b> | <b>Material</b>                 | <b>Band Gap (eV)</b> |
| Si                                                                  | 1.11                 | CuInTe <sub>2</sub>             | 0.90                 |
| SiC                                                                 | 2.60                 | InP                             | 1.27                 |
| CdAs <sub>2</sub>                                                   | 1.00                 | In <sub>2</sub> Te <sub>3</sub> | 1.20                 |
| CdTe                                                                | 1.44                 | In <sub>2</sub> O <sub>3</sub>  | 2.80                 |
| CdSe                                                                | 1.74                 | Zn <sub>3</sub> P <sub>2</sub>  | 1.60                 |
| CdS                                                                 | 2.42                 | ZnTe                            | 2.20                 |
| CdSnO <sub>4</sub>                                                  | 2.90                 | ZnSe                            | 2.60                 |
| GaAs                                                                | 1.40                 | AlP                             | 2.43                 |
| GaP                                                                 | 2.24                 | AlSb                            | 1.63                 |
| Cu <sub>2</sub> S                                                   | 1.80                 | As <sub>2</sub> Se <sub>3</sub> | 1.60                 |
| CuO                                                                 | 2.00                 | Sb <sub>2</sub> Se <sub>3</sub> | 1.20                 |
| Cu <sub>2</sub> Se                                                  | 1.40                 | Ge                              | 0.67                 |
| CuInS <sub>2</sub>                                                  | 1.50                 | Se                              | 1.60                 |
| CuInSe <sub>2</sub>                                                 | 1.01                 |                                 |                      |

### Exercício 3

Considere a radiação solar, num dia de céu azul, incidente perpendicularmente sobre um painel fotovoltaico, com intensidade de  $1000\text{ W m}^{-2}$ . Para simplificar, o espectro contínuo foi substituído por um espectro discreto com 11 componentes, correspondentes a 11 comprimentos de onda, conforme representado na tabela anexa, em que se apresenta também a intensidade de energia correspondente a cada um dos 11 comprimentos de onda  $\lambda = 0,2$  a  $2,2\text{ }\mu\text{m}$ . ( $1\text{ }\mu\text{m} = 10^{-6}\text{ m}$ ).

| $\lambda$ ( $\mu\text{m}$ ) | Intensidade ( $\text{W m}^{-2}$ ) |
|-----------------------------|-----------------------------------|
| 0,2                         | 30                                |
| 0,4                         | 100                               |
| 0,6                         | 155                               |
| 0,8                         | 190                               |
| 1,0                         | 190                               |
| 1,2                         | 120                               |
| 1,4                         | 70                                |
| 1,6                         | 50                                |
| 1,8                         | 40                                |
| 2,0                         | 30                                |
| 2,2                         | 25                                |
| <b>TOTAL 1000</b>           |                                   |

Considere uma célula de Silício (Si) com a área efectiva de  $8\text{ cm}^2$ , sobre a qual incide normalmente esta radiação.

- Qual daquelas 11 componente do espectro contribui (teoricamente) mais para a energia eléctrica produzida pela célula?
- Determine o rendimento teórico máximo da célula.
- Explique porque é o rendimento das células fotovoltaicas, na prática, sempre muito inferior à unidade.

## Exercício 4

Considere a radiação solar, num dia de céu azul, incidente perpendicularmente sobre um painel fotovoltaico, com intensidade de  $1000\text{ W m}^{-2}$ . A distribuição espectral ( $\mu\text{m}$  em abcissas,  $\text{kW m}^{-2}\mu\text{m}^{-1}$  em ordenadas) está representada pela curva AM1.5 da Fig. 3.8 (página 70) do livro G. Boyle, *Renewable Energy* (também reproduzida no texto de apoio Energias Renováveis, 3ª Parte), sendo a área limitada pela curva igual a cerca de  $1000\text{ W/m}^2$ . Para simplificar, o espectro contínuo foi substituído por um espectro discreto com 5 componentes, correspondentes a 5 comprimentos de onda  $\lambda = 0,4, 0,8, 1,2, 1,6, 2,0\mu\text{m}$ . ( $1\mu\text{m} = 10^{-6}\text{ m}$ ). A tabela abaixo dá a intensidade de energia correspondente a cada um dos 5 comprimentos de onda.

| $\lambda (\mu\text{m})$ | Intensidade ( $\text{W m}^{-2}$ ) |
|-------------------------|-----------------------------------|
| 0,4                     | 280                               |
| 0,8                     | 380                               |
| 1,2                     | 170                               |
| 1,6                     | 110                               |
| 2,0                     | 60                                |
| <b>TOTAL 1000</b>       |                                   |

- Determine, para cada um dos 5 componentes (comprimentos de onda) do espectro considerado, a energia dum fotão (expressa em J).
- Determine, para cada um dos 5 componentes (comprimentos de onda) do espectro considerado, o número de fotões que incidem, por segundo, sobre um painel com a área de  $1\text{ m}^2$  (incidência perpendicular).

Considere dois tipos de células fotovoltaicas:

- **Silício (Si)**, para o qual o *band gap* é  $E = 1,11\text{ eV} = 1,78 \times 10^{-19}\text{ J}$ .
- **Diselenieto de Cobre e Índium ( $\text{CuInSe}_2$ )**, para o qual o *band gap* é  $E = 1,01\text{ eV} = 1,62 \times 10^{-19}\text{ J}$ .

- Indique, para cada um dos dois tipos de células (**Si** e de  **$\text{CuInSe}_2$** ), quais os comprimentos de onda (de entre os 5 considerados) que contribuem para a produção de energia eléctrica da célula.
- Determine, para um painel de  $1\text{ m}^2$  de **Si**, a potência eléctrica que, teoricamente, pode ser produzida, e o respectivo rendimento. Idem para  **$\text{CuInSe}_2$** .
- Explique porque é o rendimento das células fotovoltaicas sempre muito inferior a 100%.

## Exercício 5

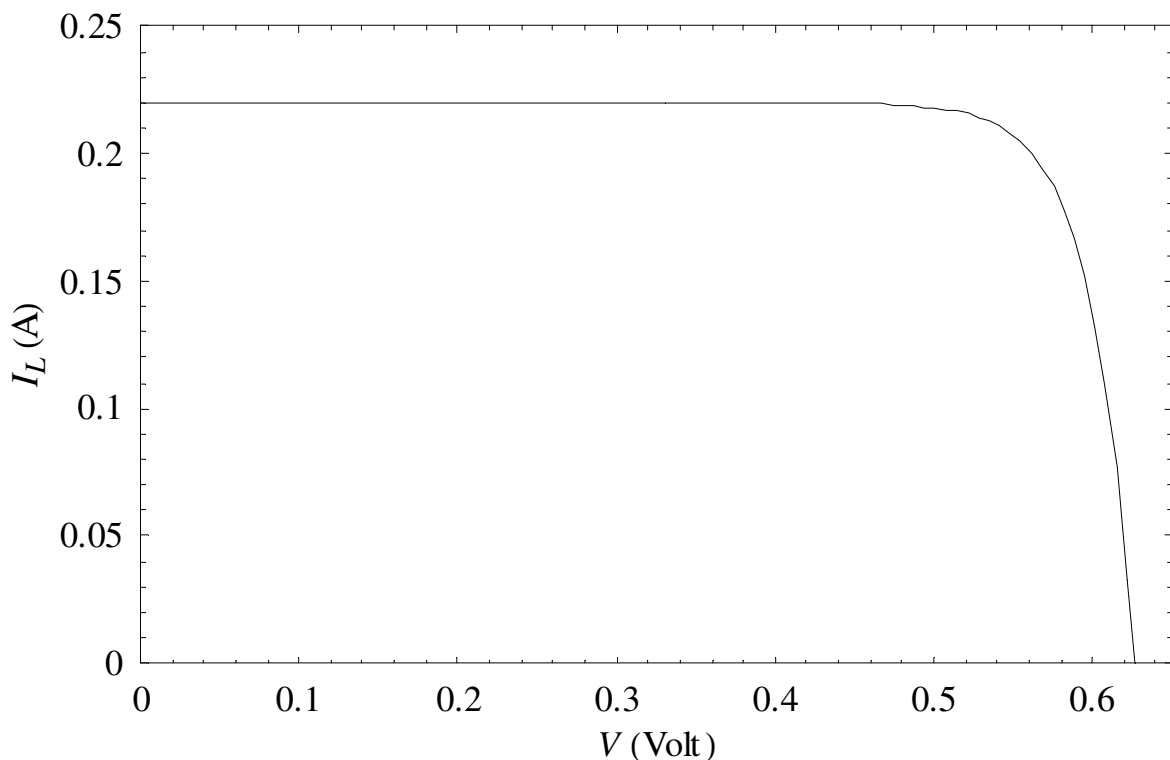
The attached figure shows the current-voltage curve of a silicon photovoltaic cell subject to solar radiation intensity of  $1000 \text{ W/m}^2$  (perpendicular incidence). The cell area is  $10 \text{ cm}^2$ , and its temperature is  $40^\circ\text{C} = 313 \text{ K}$ .

**From the curve shown in the figure:**

- Determine the open circuit voltage  $V_{oc}$  of the cell (in V).
- Determine the short circuit current intensity  $I_s$  (in A).
- Determine the dark current intensity  $I_o$  (in A).
- Determine the equation of the curve  $I_L = \text{function}(V)$  represented in the figure.
- From this equation of the curve**, determine the **maximum power** that the cell can produce (in W), and the corresponding values of the external circuit current intensity  $I_{L,m}$  (in A), the voltage  $V_m$  (in V) and the external resistance (in  $\Omega$ ).
- Determine the maximum efficiency of the cell.

**Assume now that the solar radiation level is reduced** (due, for example, to a passing cloud), and that the short circuit current intensity  $I_s$  is approximately proportional to the intensity of the solar radiation incident on the cell.

- Determine the power output of the cell (in W) if the radiation intensity is reduced from  $1000$  to  $500 \text{ W/m}^2$ . Assume that the temperature remains at  $40^\circ\text{C}$ , that the dark current intensity  $I_o$  is unchanged, and that the external resistance remains the same as in (d).

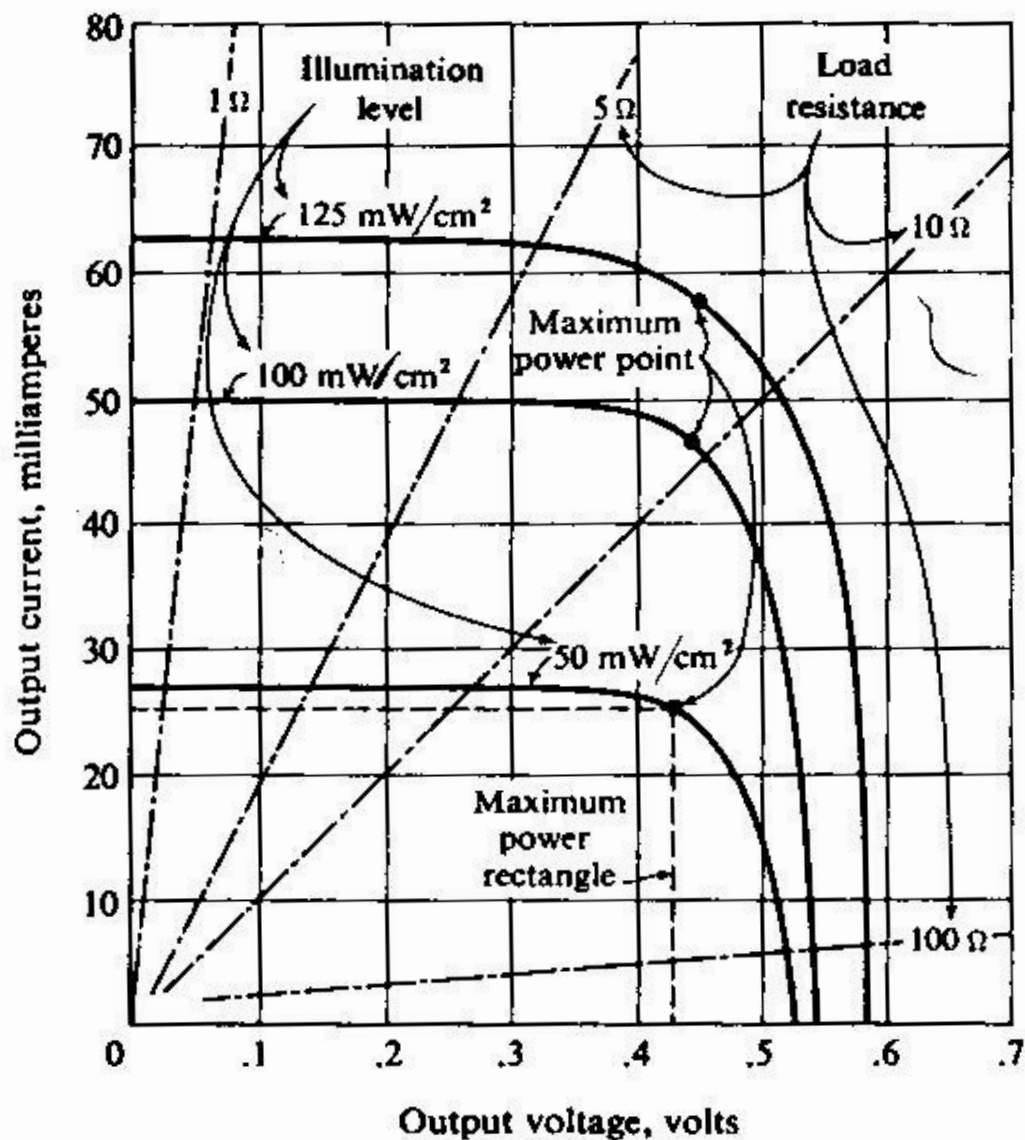


## Exercício 6

Fig. 9.8, page 422 of the book *Principles of Solar Engineering*, reproduced below, represents the current-voltage characteristics of a silicon cell, for three different illumination levels.

Consider the curve for illumination level  $100 \text{ mW/cm}^2$ , a cell with area of  $55 \text{ cm}^2$ , at a temperature of  $40^\circ\text{C}$ . From the curve:

- Determine the open circuit voltage of the cell.
- Determine the dark current of the cell.
- Determine the equation of the curve.
- From the equation of the curve**, determine the maximum power that the cell can produce (in W), and the corresponding values of the current intensity (in A), the voltage (in V) and the external resistance (in  $\Omega$ ).
- Determine the maximum efficiency of the cell.
- An application requires 1 kW at 28 V (assuming illumination level of  $100 \text{ mW/cm}^2$ ). Design a PV panel consisting of the solar cells referred to above.



## Exercício 7

Considere um painel fotovoltaico de silício, sujeito a uma radiação solar de  $900 \text{ W/m}^2$  (incidência normal), estando o painel à temperatura de  $40^\circ\text{C}$  (313 K). Nestas condições é (ver Exercício 3, a notação é a do texto de apoio):

- $J_0 = 1,8 \times 10^{-8} \text{ A/m}^2$
- $J_s = 200 \text{ A/m}^2$
- $V_{OC} = 0,624 \text{ V}$
- $V_m = 0,542 \text{ V}$
- $J_{L,m} = 190,5 \text{ A/m}^2$
- $\frac{P_{\max}}{A} = 103,25 \text{ W/m}^2$

- a) Suponha que pretende um painel fotovoltaico com uma potência de cerca de  $50 \text{ W}$  e uma tensão de cerca de  $12 \text{ V}$  (nas condições acima referidas  $900 \text{ W/m}^2$  e de  $40^\circ\text{C}$ ) constituído por células de  $8 \text{ cm}^2$  cada (área efectiva de cada célula). Indique quantas células deveria ter o painel e como deveria associar as células em série e em paralelo. Admita que a resistência exterior é tal que as células iriam trabalhar à potência máxima. Nestas condições óptimas (potência máxima), determine os valores da intensidade da corrente fornecida pelo painel e a correspondente resistência exterior  $R_{\text{painel,opt}}$ .
- b) Suponha que a resistência exterior aumenta (em relação ao valor óptimo  $R_{\text{painel,opt}}$ ) de tal modo que a intensidade da corrente fornecida pelo painel se reduz a metade. Determine os novos valores da potência e da tensão do painel, e da resistência exterior  $R_{\text{painel}} > R_{\text{painel,opt}}$ .

## Exercício 8

Considere um painel fotovoltaico de silício, sujeito a uma radiação solar de  $900 \text{ W/m}^2$  (incidência normal), estando o painel à temperatura de  $40^\circ\text{C}$  (313 K). Nestas condições é (ver Exercício 3, a notação é a do texto de apoio):

- $J_0 = 1,8 \times 10^{-8} \text{ A/m}^2$
- $J_s = 200 \text{ A/m}^2$
- $V_{OC} = 0,624 \text{ V}$
- $V_m = 0,542 \text{ V}$
- $J_{L,m} = 190,5 \text{ A/m}^2$
- $\frac{P_{\max}}{A} = 103,25 \text{ W/m}^2$

- c) Suponha que pretende um painel fotovoltaico com uma potência de cerca de  $50 \text{ W}$  e uma tensão de cerca de  $12 \text{ V}$  (nas condições acima referidas  $900 \text{ W/m}^2$  e de  $40^\circ\text{C}$ ) constituído por células de  $8 \text{ cm}^2$  cada (área efectiva de cada célula). Indique quantas células deveria ter o painel e como deveria associar as células em série e em paralelo.

Admita que a resistência exterior é tal que as células iriam trabalhar à potência máxima. Nestas condições óptimas (potência máxima), determine os valores da intensidade da corrente fornecida pelo painel e a correspondente resistência exterior ( $R_{\text{painel,opt}}$ ).

- d) Considere o mesmo painel. Suponha que a resistência exterior aumenta (em relação ao valor óptimo  $R_{\text{painel,opt}}$ ) de tal modo que a intensidade da corrente fornecida pelo painel se reduz a metade. Determine os novos valores da potência e da tensão do painel, e da resistência exterior  $R_{\text{painel}} > R_{\text{painel,opt}}$ .